

Análisis geoquímico de acuíferos confinados entre Carnerillo y Ballesteros Sur. Córdoba. Argentina

Luciana Maldonado^{1,2}, Adriana Cabrera¹ y Mónica Blarasin¹

¹ Departamento de Geología (FCEFGyN), Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Ruta 36, Km 601, (5800) Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

² Becaria de CONICET.

Mail de contacto: lmaldonado@exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

El área está destinada a actividades agrícola-ganaderas, abasteciéndose de sistemas acuíferos confinados, de mejor calidad que el libre. El objetivo es la caracterización preliminar hidrogeológica de estos sistemas profundos, con énfasis en los aspectos geoquímicos. Se utilizaron metodologías hidrogeológicas convencionales y análisis estadístico multivariado en el tratamiento de la información. Los acuíferos profundos son pre-Cuaternarios y multicapa, conformado por delgadas capas de arenas-gravas, confinadas por potentes paquetes arcillosos, continentales (al Oeste) y marinos (al Este). Se observa una fuerte influencia de los megabloques, limitados por fallas regionales N-S, sobre la hidrolitología y la calidad del agua subterránea. Los sistemas acuíferos confinados muestran cambios de salinidad y tipo geoquímico (bicarbonatado a sulfatado-clorurado) asociados a cambios litológicos, distancia a la recarga y profundidad de las capas. Las concentraciones de As y F son más bajas que en el acuífero libre (loess pampeano) y, en general, no muestran buena correlación estadística.

Palabras clave: acuíferos confinados, geoquímica, estadística multivariada.

ABSTRACT

The area is destined to agricultural and livestock activities, abstracting groundwater from confined aquifers, which have better quality water than the unconfined one. The aim of this work is to characterize the confined aquifers from a hydrogeological point of view, with emphasis on geochemical features. Hydrogeological conventional methodologies were used, incorporating statistical analysis on data processing. The deep aquifers are pre-Quaternary and show a multilayered structure, formed by thin sandy-gravel layers confined between thick clay deposits. The sediments are from continental (West) and marine (East) origin. There is a strong influence of N-S regional faults on lithology and groundwater quality. The confined aquifers show changes in salinity and geochemical type (bicarbonate to sulfate-chloride) linked to lithological changes, distance from recharge and aquifer depth. As and F- concentrations are lower than in the unconfined aquifer (Pampean loess) and do not show statistical correlation.

Keywords: confined aquifers, geochemistry, multivariate statistic.

Introducción y Objetivo

En la llanura pampeana cordobesa, uno de los recursos hídricos más utilizados para las diferentes actividades que se desarrollan en el área (agrícola-ganadera, abastecimiento urbano) es el agua subterránea. Generalmente, el acuífero libre resulta ser el más explotado dado su menor costo de extracción. Sin embargo, en la zona investigada, no ofrece los caudales necesarios para algunos emprendimientos por la baja conductividad hidráulica (K) de las arenas muy finas limosas que lo componen y, en otros, por problemas significativos de calidad del agua, tales como salinidades muy altas (3 a 10 g/L), principalmente al Este y Sudeste, o a la

presencia de altos tenores de As y F⁻ de origen natural (Blarasin y Cabrera, 2005). Dada esta problemática, se realizan perforaciones más profundas que captan de acuíferos confinados que, en general, poseen agua de mejor calidad que el sistema freático.

La zona estudiada se encuentra en plena llanura pampeana, a 100 km al Este de la Sierras de Comechingones, entre las coordenadas geográficas 32° 30' y 33° 00' de latitud Sur y 64° 00' y 63° 00' de longitud Oeste y abarca un área de 6.000 Km². Se caracteriza por estar destinada principalmente a la agricultura y a la ganadería, utilizando para dichas actividades agua de los acuíferos profundos. A partir de la relevancia económica-social que éstos tienen, surge el objetivo de

de los resultados permitió la elaboración del modelo preliminar hidrogeológico conceptual del área.

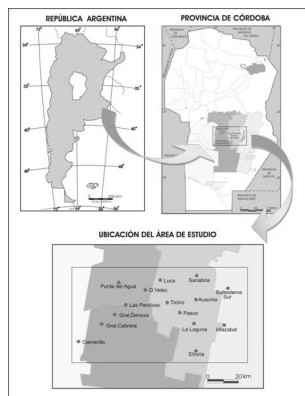


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Metodología de trabajo

El análisis geológico-geomorfológico se realizó a escala 1:250.000, sobre la base de cartas planialtimétricas y satelitales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y Google Earth. Los antecedentes del área referidos a los sedimentos aflorantes y los identificados en perforaciones profundas (aproximadamente 400 m) conjuntamente con el censo hidrogeológico realizado, permitieron efectuar correlaciones litoestratigráficas del área, con el fin de interpretar la disposición espacial de las diferentes capas acuíferas. Los datos de perforaciones proceden casi en su totalidad de la empresa Renz. Los sitios de muestreo fueron censados en función de los datos preexistentes y del grado de acceso a los mismos. Durante el censo hidrogeológico se recogieron datos vinculados a cargas hidráulicas (mediante el uso de manómetros en el caso de perforaciones surgentes), materiales presentes, diseño de las perforaciones y se determinaron in situ temperatura, conductividad eléctrica (CE), pH y oxígeno disuelto (OD), extrayéndose muestras para las determinaciones de iones mayoritarios, minoritarios y trazas (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , F^- , As , Fe y Mn). Se elaboraron además, mapas (geológico-geomorfológico y geoquímicos de interés) y gráficos (perfiles de correlación litoestratigráfica, diagramas de Stiff). Se aplicaron metodologías estadísticas descriptivas uni y multivariada (cluster) para el tratamiento de la información obtenida. Finalmente, la interpretación conjunta

Caracterización Climática, Geológica y Geomorfológica

Para la clasificación climática se trabajó con la serie de precipitaciones Idiazábal que abarca el período 1963-2010. El clima del área se caracteriza por ser Mesotermal Subhúmedo Seco con nulo o pequeño exceso de agua, con una temperatura media anual de 16,5°C. La precipitación media anual es de 779 mm, con una distribución estacional que concentra el 71% de las lluvias en los meses de primavera-verano.

El área forma parte de una cuenca sedimentaria agradacional, delimitada por megaestructuras regionales que controlan grandes bloques con diferentes características. Este control estructural y las diferentes condiciones paleambientales han definido las importantes variaciones litoestratigráficas encontradas especialmente en los sedimentos más profundos (Renz, 1993, Gomez, 1995, Blarasin y Cabrera, 2005). En la zona se destacan las fallas de orientación N-S (Reducción-Del Chañar, Pampayasta-Alejandro y El Rastreador-Los Cisnes), a las que se le asocian en sentido W-E y NE-SW estructuras menores (Chaito-Chazón y Arroyo Cabral, respectivamente) (Fig. 2). De los sedimentos identificados en perforaciones profundas se pudo diferenciar que, hacia el Oeste de la falla Pampayasta-Alejandro predominan materiales continentales y hacia el Este, sedimentos marinos (arcillas verdes), asociados a intrusiones marinas ocurridas en el Mioceno (Renz, 1993, Gomez, 1995, Blarasin et al., 2005). Geomorfológicamente, la zona corresponde a una extensa planicie que se suaviza hacia el SE, con valores de gradientes menores al 1%. Se reconocieron tres unidades geomorfológicas, denominadas: "*Planicie loessoides con dunas longitudinales*", "*Llanuras fluvio-eólicas imperfectamente drenadas*" y "*Fajas Fluviales*". La primera se encuentra al Oeste de la estructura Pampayasta-Alejandro y se caracteriza por un relieve de moderado a suavemente ondulado, conformado por sedimentos eólicos (loess) de edad Holocena pertenecientes a la Formación Laguna Oscura (Cantú, 1992), constituyen dunas longitudinales de rumbo NNE-SSW, dispuestas y discontinuas. La segunda unidad se encuentra hacia el centro-Este del área, se caracteriza por ser una extensa planicie desarrollada en un ambiente deprimido mayor (Pasotti, 1974). Constituye el

relleno de grandes depresiones tectónicas delimitadas por estructuras regionales meridianas y segmentadas, a su vez, por otras transversales que generan bloques menores. Dentro de esta unidad se reconocen dos subunidades denominadas "*Depresión con sistemas de lagunas*" caracterizada por una paleored de escurrimiento de bajos rectilíneos que sigue la pendiente regional o lineamientos estructurales principales, que alojan sistemas lagunares que se interconectan y, "*Planicie con drenaje araña*", donde se destaca una red de

líneas de escurrimiento rectas que, con dirección centrípeta, confluyen hacia las depresiones centrales, muchas de ellas ocupadas actualmente por lagunas permanentes. La última unidad, corresponde a las fajas fluviales de los arroyos Tegua, Carnerillo, Chaito-Chazón, Cabral, San José y un pequeño tramo del río Tercero. Estas fajas poseen diferentes características y, en general, todas exhiben importantes procesos de erosión fluvial.

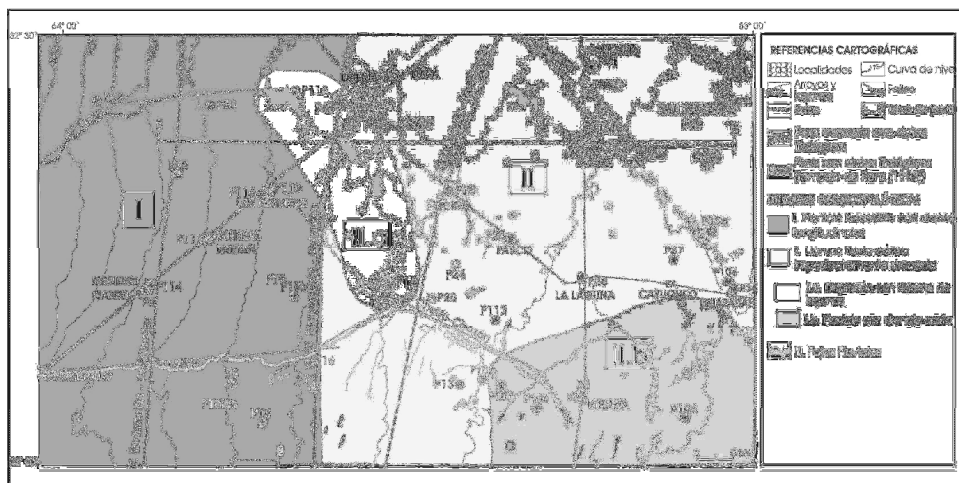


Figura 2. Mapa geológico-geomorfológico.

Hidrogeología

El acuífero libre se extiende hasta los 80-100 m de profundidad, está constituido por sedimentos cuaternarios arenosos finos limosos, de origen fundamentalmente eólico (loess), que se encuentran parcial y diferencialmente cementados. La base de este acuífero está conformada por materiales arcillosos. Por debajo del mismo se ha identificado un importante sistema de acuíferos confinados (Fig. 3), multicapa, pre-Cuaternario, constituido por delgadas capas de granulometrías variables (arenas medias, gruesas y gravas), de escaso espesor (entre 1-8 m), confinadas por potentes paquetes arcillosos que les otorgan distintos grados de confinamiento. De acuerdo a las características granulométricas, se asume que los materiales que constituyen los diferentes niveles acuíferos profundos, poseen una K del orden de 100-500 m/d (Custodio y Llamas, 1983). Al Oeste de la falla El Rastreador-Los

Cisnes, los materiales que forman estos sistemas profundos (tanto las capas de arenas como las arcillas que confinan) son de origen continental (Formación Tigre Muerto, Terciario superior) y está relacionado a sedimentación eólica y fluvial proveniente de la zona periserrana (Blarasin, 2003). Al Este de esta estructura los materiales arcillosos que se encuentran por encima de los sistemas profundos, se destacan las arcillas verdes-azuladas (Formación Paraná), asociadas a ingresiones marinas ocurridas durante el Mioceno medio (Renz, 1993, Gomez, 1995, Blarasin, 2003). Los sistemas acuíferos (lentes de arenas intercaladas en arcillas castañas), situadas por debajo de estas arcillas verdes, podrían corresponderse a la Formación Chaco (Russo et al., 1979) de edad eocena-miocena inferior. A estos niveles profundos se les ha asignado edades y comportamientos hidráulicos con dudas, debido a la escasez de información vinculada a dataciones, geofísica y a la

incertidumbre inherente a las profundidades de las perforaciones (informadas en la mayoría de los casos), lo que hizo dificultoso correlacionar los distintos niveles, y por lo tanto generar una clasificación hidroestratigráfica acabada. El esquema de la figura 3, corresponde a aspectos específicos del perfil entre las localidades de Las Perdices y Ballesteros Sur, cuya traza se indica en el mapa Geomorfológico (Fig.2),

mientras que, se elaboraron columnas hidro litológicas típicas y más generales, que engloban características halladas en otras perforaciones de otras transectas (Fig. 4.). Se definieron 2 grandes sistemas de acuíferos profundos (SCA y SCB) con distinto grado de confinamiento, diferenciados por la profundidad donde se alojan y características hidráulicas observadas.

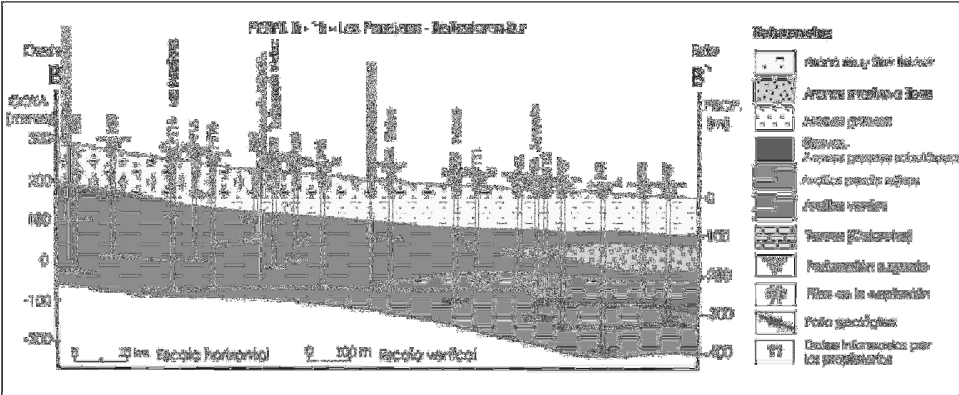


Figura 3. Perfil hidrogeológico B - B. Las Perdices – Ballesteros Sur.

El sistema más somero SCA se encuentra a profundidades variables en función de los bloques existentes en el área. Al Oeste de la falla Pampayasta-Alejandro, se encuentra entre los 120-180 m de profundidad (SCA1). En el bloque central, entre esta falla y la del El Rastreador-Los Cisnes, se lo encuentra entre los 220-235 m (SCA2). Al Este de esta última estructura se lo distingue entre los 150 m y los 190 m de profundidad, aunque se le asigna nomenclatura con dudas (SCA?), porque si bien se cuenta con información litológica no se dispone de datos hidráulicos e hidroquímicos ya que estas capas en este bloque no han sido habilitadas en las captaciones. Las perforaciones que captan agua de este sistema SCA son tanto surgentes como semisurgentes, con niveles piezométricos que varían entre -22 m y +5 m. El sistema más profundo, denominado SCB, también se presenta a diferentes profundidades. Se encuentra entre los 250 m y 330 m de profundidad al Oeste de la falla El Rastreador-Los Cisnes (SCB1) y entre 280 m y 390 m hacia el Este de dicha estructura (SCB2). Las perforaciones que captan de este sistema son todas surgentes con niveles piezométricos mayores a SCA (> +5 m). Se asume un mayor grado de confinamiento dada su mayor profundidad de yacencia, espesor de

sedimentos netamente arcillosos que actúan como techos y cargas hidráulicas observadas.

Sin embargo, en el sistema SCB1, se

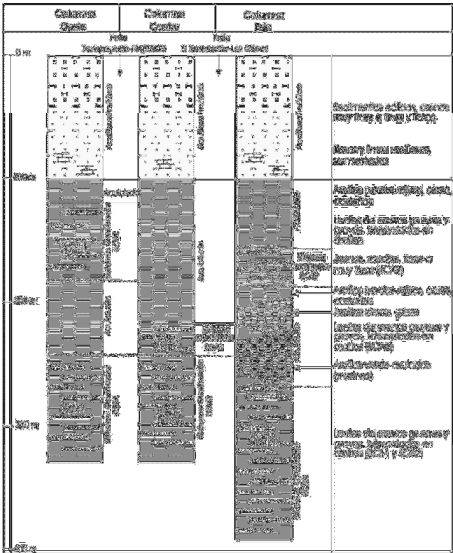


Figura 4. Columnas litológicas típicas del área estudio.

distinguen variaciones en cuanto a la granulometría de los materiales que actúan como techo, encontrándose al Noroeste del área, que los mismos son materiales limo-arcillosos. En general, la piezometría muestra que la dirección de flujo de estos sistemas acuíferos confinados es hacia el Este, al Oeste de la falla Pampayasta-Alejandro, y hacia el Sureste, al oriente de la misma (Renz, 1993).

Geoquímica

El acuífero libre, de aguas dulces a saladas, presenta conductividades eléctricas (CE) del orden de 1.365 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hacia el occidente, hasta 10.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sector oriental. El carácter geoquímico es mixto con predominio del ión sulfato (sulfatado-bicarbonatado, sulfatado-clorurado) alcanzando las aguas más saladas el tipo geoquímico clorurado-sulfatado, siempre sódico. La salinización y tipo geoquímico que alcanza el agua en este sistema se explica por su posición intermedia en el flujo hidrológico regional (Blarasin, 2003), por su baja velocidad de circulación y también, por los sedimentos finos (loess) que lo forman. El agua freática presenta concentraciones de As y F^- variables, desde 30 $\mu\text{g}/\text{L}$ hasta 240 $\mu\text{g}/\text{L}$ y de 0,27 mg/L a

2,9 mg/L , respectivamente. De acuerdo a los antecedentes hidrogeológicos para el Sur de Córdoba, la presencia de estos elementos, forman parte del fondo natural de la calidad del agua y están asociados a los componentes principales del loess pampeano (vidrio volcánico, minerales y fragmentos líticos) que constituyen el acuífero libre (Nicolli et al., 1989, Blarasin y Cabrera, 2005). Los principales procesos de liberación de As son la disolución de vidrio volcánico y la desorción a partir de los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn (Nicolli, 1997, Smedley et al, 2000). En este ambiente oxidante se ha probado que en un 90 % el As disuelto corresponde a As^{+5} . Por su parte, los procesos de liberación de F^- serían la disolución de vidrio volcánico y de otros minerales portadores de F como por ejemplo, fluorita (Ca_2F) (Nicolli, 1997, Blarasin, 2003).

Los sistemas acuíferos profundos poseen aguas de salinidades y tipo geoquímico variables. El sistema más somero SCA presenta salinidades entre 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 3.150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y tipo geoquímico sulfatado a sulfatado-bicarbonatado (Tabla 1).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de los sistemas confinados.

	SISTEMA CONFINADO SCA				SISTEMA CONFINADO SCB1				SISTEMA CONFINADO SCB2			
	MEDIA	MÁX	MÍN	DS	MEDIA	MÁX	MÍN	DS	MEDIA	MÁX	MÍN	DS
pH	7.7	8.0	7.5	0.2	7.6	7.9	7.1	0.3	7.6	8.2	7.1	0.2
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1955.2	3430.0	1088.0	891.5	1346.3	4000.0	611.0	903.8	2374.6	3600.0	1497.0	562.9
SDT (mg/L)	1368.6	2401.0	761.6	624.0	965.4	3122.0	427.7	706.9	1662.2	2520.0	1047.9	394.1
HCO_3^- (mg/L)	281.5	355.0	210.0	63.9	244.6	375.0	175.0	52.4	254.2	377.5	145.0	62.9
SO_4^{2-} (mg/L)	537.1	945.4	281.0	286.4	346.2	1548.2	67.1	391.4	674.7	1863.8	166.1	478.3
Cl (mg/L)	210.9	522.9	85.7	177.8	128.1	494.3	22.9	135.5	283.3	414.3	157.1	67.5
Na^+ (mg/L)	355.1	576.3	169.9	159.2	246.9	891.8	118.3	202.2	444.4	784.6	254.8	133.4
K^+ (mg/L)	14.3	18.8	11.0	3.5	11.9	28.1	7.0	5.6	12.3	17.4	6.0	4.0
Ca^{+2} (mg/L)	86.4	204.8	47.2	67.0	67.1	224.8	25.6	54.1	130.7	390.4	51.2	92.9
Mg^{+2} (mg/L)	14.0	20.0	8.8	4.3	7.8	14.6	3.4	3.5	10.3	17.1	1.5	3.8
As ($\mu\text{g}/\text{L}$)	31.0	90.0	15.0	33.1	28.4	75.0	10.0	22.0	72.5	160.0	10.0	56.2
F (mg/L)	0.5	1.0	0.2	0.3	0.4	1.1	0.1	0.3	0.4	1.4	0.1	0.3
Fe ($\mu\text{g}/\text{L}$)	2.7	2.7	2.7	0.0	112.2	480.5	2.7	188.8	23.1	190.4	2.7	47.4
Mn ($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.5	0.5	0.5	0.0	3.8	23.3	0.5	8.6	69.9	224.1	0.5	63.3

En el sistema SCB, se puede apreciar que SCB1 localizado entre los 250-330 m de profundidad, presenta en general, salinidades del orden de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólo 2 muestras presentaron valores de 2.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sector Noroeste de este subsistema. En este caso la baja salinidad está vinculada a que la capa acuífera es de arenas y gravas fundamentalmente cuarzosas (Maldonado, 2013), por lo que los procesos de

transferencia de iones al agua estarían minimizados. En SCB1 dominan las aguas bicarbonatadas, sulfatadas-bicarbonatadas siempre sódicas (Fig. 5).

El sistema SCB2, alojado entre los 280 y 390 m, posee aguas con mayor variabilidad salina (de 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 3.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y con tipos geoquímicos sulfatado, sulfatado-clorurado, clorurado-bicarbonatado y clorurado-

sulfatado, que indican una mayor evolución del agua en este sistema.

En estos sistemas profundos, As y F⁻ se encuentran en general en bajas concentraciones. El sistema SCA, en general, posee tenores de As y F⁻ del orden de 15 µg/L y 0,3 mg/L, respectivamente, a excepción de P6 (que capta agua de niveles más profundos dentro del sistema SCA1) que alcanza 90 µg/L de As y 1,0 mg/L de F⁻. Se observa una alta correlación estadística entre estos elementos ($r=0,8$).

En SCB se observan variaciones significativas de As y F⁻ entre los subsistemas. SCB1 posee tenores promedio del orden de 30 µg/L de As (mín=10 µg/L; máx= 75 µg/L) y 0,4 mg/L de F⁻ (mín= 0,11 mg/L, máx= 1,1 mg/L), encontrándose también muy buena correlación entre ambos ($r=0,8$). En cambio, SCB2, presenta tenores de As entre 10 y 160 µg/L y de F⁻ entre 0,13 y 1,4 mg/L, es decir, es el sistema que posee las concentraciones más elevadas de ambos elementos. Sin embargo, la correlación estadística observada entre ellos es baja ($r=0,3$).

La existencia de estos elementos en los sistemas confinados debe necesariamente vincularse a una mineralogía portadora, aunque, si bien muestreadas, no se dispone aún de análisis mineralógico de estas capas. Si bien en profundidad podría haber vidrio volcánico que aporte ambos elementos, es probable que jueguen un rol importante en la liberación de As la presencia de óxidos o hidróxidos de Mn y Fe, dado que el ambiente más reductor a estas profundidades (valores de OD del orden de 2 mg/L), podría alterar la estructura y propiedades de superficie de los óxidos generando la liberación y entrada en solución de Fe, Mn y As. En el sistema SCB2, más profundo, las concentraciones de Mn halladas en el agua resultaron superiores (Mn \approx 70 µg/L) a las presentes en los sistemas SCA y SCB1 (Mn \approx 3 µg/L). Se observó además en SCB2 buena correlación estadística entre Mn y As ($r = 0,7$ y $p < 0,01$). En cuanto al Fe, se observan concentraciones más elevadas en SCA y SCB1 (Fe \approx 112 µg/L) que en SCB2 (Fe \approx 20 µg/L) y no se observa correlación con el As en ningún sistema.

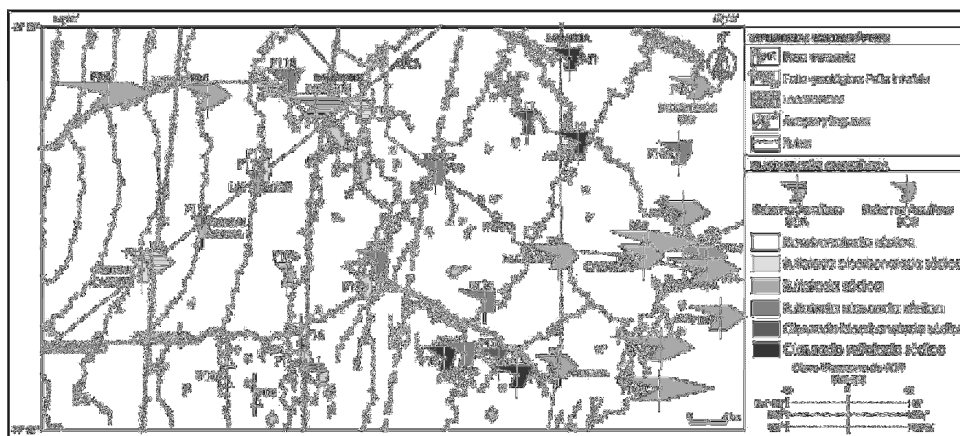


Figura 5. Mapa geoquímico. Diagramas de Stiff. Carnerillo-Ballesteros Sur.

El tratamiento de los datos a través del análisis multivariado entre observaciones -modo Q- (Fig. 6), permitió identificar, a una línea de corte del 82,5%, tres grandes grupos geoquímicos: **A**, **B** y **C**, relacionados principalmente por la CE y tipo geoquímico del agua y en menor grado por la profundidad del sistema. El grupo **A** asocia principalmente a las aguas del sistema SCB1 con CE del orden de 600 a 1.200 µS/cm. El segundo núcleo, **B**, concentra aquellas muestras con CE

intermedias (entre 1.500-2.660 µS/cm), de tipo geoquímico mixto y, en general del sistema SCB2. Por último, el grupo **C** contiene a las muestras más saladas que poseen CE del orden de 2.900 a 4.000 µS/cm y de tipo geoquímico sulfatado sódico, agrupando así al resto de las muestras más saladas del sistema SCB2 y a la de mayor CE del sistema SCA1.

Los 3 grandes grupos obtenidos poseen internamente subgrupos que quedaron especialmente condicionados por la CE, el tipo

geoquímico y en menor grado la profundidad de la capa acuífera.

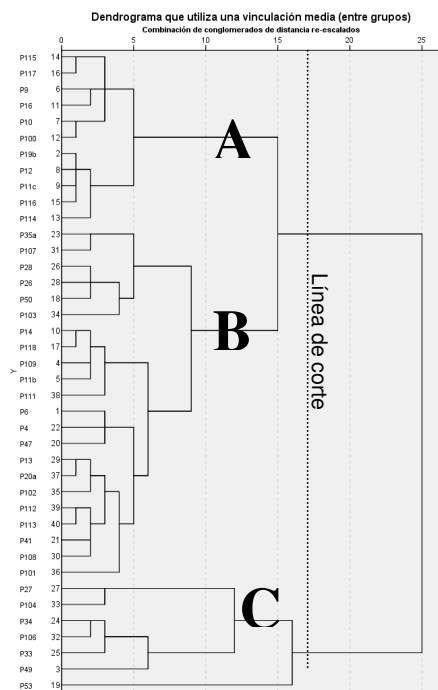


Figura 6. Dendrograma modo Q.

El análisis multivariado entre variables, modo R, fue realizado en forma separada para los distintos sistemas en función de los resultados obtenidos del modelo hidroestratigráfico y geoquímico conceptual. Los sistemas SCA y SCB1, dieron dendrogramas similares (Fig. 7, izq.), con dos grandes grupos. El grupo 1 que explica la salinidad del agua dado por la CE (con un núcleo de aguas sulfatadas) unido a todos los iones mayoritarios (excepto HCO_3^-). El grupo 2 que asocia As y F al que se le une en menor grado HCO_3^- , y en menor grado aún Fe, Mn y pH, lo que estaría indicando el origen común de As y F.

El dendrograma resultante para el sistema SCB2 (Fig. 7, der.), también muestra dos grupos pero con una configuración diferente al anterior. El grupo 1, queda definido por un núcleo de SO_4^{2-} y Ca^{2+} fuertemente vinculada a la CE y en menor medida a otros iones mayoritarios, explicando la composición salina de estas capas. Se le une en muy bajo grado el Fe. El núcleo 2, formado por la asociación de Mg^{2+} y K^+ al que se le une en grados de afinidad cada vez menores, As, Mn, HCO_3^- y el núcleo F y pH. Se observa que el As quedó más vinculado a

Mn disuelto mientras F estaría especialmente vinculado a los valores de pH.

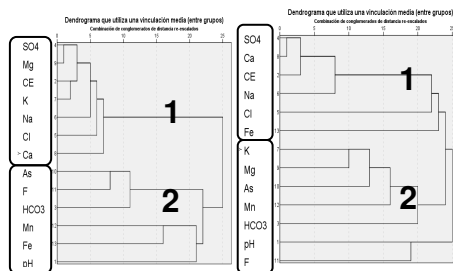


Figura 7. Dendrograma modo R. (Izq.) para los sistemas SCA y SCB1. (Der.) para SCB2

Conclusiones

El área está controlada por estructuras geológicas regionales, que tienen una marcada incidencia, principalmente las de orientación N-S, en la evolución de la sedimentación Cuaternaria y pre-Cuaternaria de la región y en la dinámica y calidad del agua. Los sistemas acuíferos confinados están conformados por delgadas capas de arenas gruesas y gravas, de poco espesor y geometrías variables. Dichas capas están limitadas por espesos paquetes de materiales arcillosos que le otorgan distintos grados de confinamiento. Este sistema multicapa está asociado a distintos estadios de paleosistemas sedimentarios continentales y marinos ocurridos durante el Terciario.

Los dos sistemas acuíferos confinados distinguidos (SCA y SCB) poseen características hidráulicas, profundidades y calidades de agua diferentes. El sistema más somero, SCA, de menor grado de confinamiento, posee menor carga hidráulica que los sistemas más profundos, incluso inferiores en algunos casos al sistema freático.

Realizado el análisis estadístico multivariado se corroboraron agrupamientos (en modo Q y R), que confirman las diferencias halladas en el modelo conceptual. De este modo, se concluye que el agua del sistema SCA es en general, levemente más salina que el sistema más profundo y de tipo geoquímico sulfatado y sulfatado-clorurado sódico. El sistema SCB1 se caracteriza por presentar aguas más dulces y de carácter geoquímico bicarbonatado y sulfatado-bicarbonatado, mientras que SCB2 posee las aguas mas saladas, sulfatadas-cloruradas y cloruradas sódicas. La distribución geoquímica observada permite interpretar que el cambio en salinidad y

tipo geoquímico estaría influenciado por las granulometrías y mineralogía de las capas acuíferas, la distancia recorrida desde la recarga en el pedemonte occidental y la profundidad de captación en los diferentes megabloques de la región.

En todos los sistemas confinados evaluados, As y F quedan vinculados, en mayor o menor grado, a las aguas con mayor alcalinidad para los pH medidos (entre 7 y 8). As y F podrían vincularse a la ocurrencia de similares mecanismos de liberación que los del acuífero freático, si bien éste posee sedimentos loésicos con mineralogías portadoras cuya posibilidad de liberar estos elementos es reconocidamente alta. En presencia de aguas alcalinas, estos elementos procederían de la disolución de vidrio volcánico a altos pH, a lo que se sumaría la desorción de As a partir de óxidos de Fe y Mn y, para el caso del F, la disolución de minerales como fluorita. Sin embargo, dadas las granulometrías gruesas de las capas confinadas y su origen, es esperable que posean menores cantidades de los minerales portadores mencionados. En el caso de los óxidos, además, dada las profundidades de captación y los valores bajos de OD hallados, el ambiente más reductor alteraría la estructura y propiedades de las superficies de los mismos, generando la liberación y entrada en solución de Fe, Mn y As.

Las diferencias en los contenidos de As y F en agua y en las asociaciones geoquímicas observadas en las capas confinadas ubicadas a diferentes profundidades, podrían deberse a cambios litológicos de los diferentes ambientes de sedimentación al Oeste y Este de la zona estudiada. Para ajustar el modelo hidrogeoquímico elaborado sería necesario contar con mayor cantidad de datos litológicos (granulometría, mineralogía, presencia de materia orgánica, entre otros).

Como recomendación puede remarcarse que, dado el ambiente geoquímico señalado para los acuíferos confinados, sería de mucho interés realizar la especiación de As, ya que es probable que aumente la proporción de As^{+3} , mas tóxico, respecto a As^{+5} . Es decir, en estas capas profundas no dominaría la especie más oxidada de As, como señalan algunos autores para el ambiente oxidante del acuífero libre de la llanura pampeana.

Agradecimientos

El trabajo fue subsidiado por FONCyT y MINCyT (PID 35/08) y SECyT-UNRC. Se agradece a Renz perforaciones por la información suministrada.

Referencias

- Blarasin, M., 2003. Geohidrología Ambiental del Sur de Córdoba, con énfasis en la ciudad de Río Cuarto y su entorno rural. *Tesis Doctoral*. UNRC. Inédita
- Blarasin, M. y A. Cabrera, 2005. Aguas subterráneas: hidrolitología, hidrodinámica e hidrogeoquímica regional. En *Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Cba.: una perspectiva geoambiental*. Ed. UNRC ISBN: 950-665-350-X. pp. 235-241.
- Blarasin, M., S. Degiovanni, M. Villegas y A. Cabrera, 2005. En *Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Cba.: una perspectiva geoambiental*. Ed. UNRC ISBN: 950-665-350-X. pp. 235-241.
- Cantú, M., 1992. Holoceno de la prov. de Córdoba. Manual: Holoceno de la Rep. Arg. Tomo I. *Símpoio Internacional sobre el Holoceno en América del Sur*. 24 pág. Paraná. Argentina.
- Custodio, E. y R. Llamas, 1983. *Hidrología subterránea*. Ed. Omega. Barcelona.
- Gomez, M., 1995. La formación pampeana en la llanura cordobesa, línea de costa de la ingresión del Entrerriano. *Asoc. Arg. de Geol. Apl. a la Ing.* Vol. 3: 232-254. San Juan. ISSN 0326 1921.
- Maldonado, L., 2013. 2º Informe de Doctorado. UNRC. Inédito
- Nicolli, H., Suriano, J., Gómez Peral, M., Ferpozzi, L. y O. Balean, 1989. Groundwater contamination with Arsenic and other trace elements in an area of the province of Córdoba, Argentina. *Environmental Geology and Water Sciences*. Vol. 14, N°1, pág. 3-16.
- Nicolli, H., P. Smedley y J. Tullio, 1997. Aguas subter. con altos contenidos de F, As y otros oligoelementos en el Norte de La Pampa. *Congreso Internac. del Agua*. Bs. As. III 40.
- Passotti P., 1974. La Neotectónica en la llanura pampeana. Fundamentos para el Mapa Neotectónico. *Inst. de Fisiografía y Geología*. Publ. LVIII, UNR. Rosario. Arg.
- Renz, H., 1993. Caracterización Hidrogeológica preliminar del área central de Córdoba. *Trabajo Final*. UNC. Inédito. Córdoba. Argentina
- Russo, A., R. Ferello y G. Chebli, 1979. Llanura Chaco Pampeana. *Geología Reg. Argentina*. Vol. I. Pp. 139-183
- Smedley, P., D. Macdonald, H. Nicolli, A. Barros, J. Tullio & J. Pearce. 2000. Arsenic and other quality problems in groundwater from Northern La Pampa province, Argentina. Nottingham. TR WC/99/36. British Geological Survey. 176 p.